

Reference 7

⑩ 日本国特許庁(JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A)

昭63-303216

⑬ Int. Cl.⁴

識別記号

庁内整理番号

⑭ 公開 昭和63年(1988)12月9日

F 16 C 32/04
H 02 K 7/09

A-6718-3J
6650-5H

審査請求 未請求 発明の数 1 (全7頁)

⑮ 発明の名称 磁気軸受装置

⑯ 特 願 昭62-137900

⑰ 出 願 昭62(1987)6月1日

⑱ 発 明 者 鶴 田 和 博 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号 富士電機株式会社

⑲ 出 願 人 富士電機株式会社 神奈川県川崎市川崎区田辺新田1番1号

⑳ 代 理 人 弁理士 山 口 巖

明 細 書

1. 発明の名称 磁気軸受装置

2. 特許請求の範囲

磁性体からなる軸をそれぞれ径方向に吸引するように該軸のまわりに配設された複数個の直流電磁石と、電磁石に流れる励磁電流の値を検出する電流検出器と、各電磁石により発生される軸に對する電磁的な吸引力を検出する力検出器と、電流検出器により検出された励磁電流の値と力検出器により検出された吸引力の値とから電磁石と軸との間の空隙長の値を計算により求める空隙長計算手段と、該手段により複数個の電磁石に對してそれぞれ計算された空隙長の値から軸の偏心量が所定の設定値になるように各電磁石に對する励磁電流の値を調節する励磁電流制御回路とを備えてなる磁気軸受装置。

3. 発明の詳細な説明

(産業上の利用分野)

本発明は磁界を用いて回転機械等の軸を非接触で支持する磁気軸受装置であって、能動形と称さ

れる種類のものに関する。

(従来の技術)

上述の磁気軸受装置は、磁性体からなる軸のまわりにそれを径方向に吸引する電磁石を複数個配設して、これら電磁石に對する励磁電流を制御することにより軸を磁気的に浮かせた状態で支承するもので、完全無接触の軸受であるため潤滑が不要で高速回転に適する等の種々の長所がある。この種の磁気軸受装置の従来例を第6図および第7図に示す。

第6図において、軸1のまわりに4個の電磁石2a~2dが配設されており、これらの内上下の電磁石2a, 2bが軸1の上下方向の位置を制御し、左右の電磁石2c, 2dが軸1の左右方向の位置を制御するわけであるが、よく知られているように電磁石と軸との間の空隙長が小さくなればなる程電磁石の電磁吸引力が増加するため、この磁気軸受装置は本質的には不安定であって上下または左右の電磁石の吸引力を互いに拮抗させてやらねばならない。この吸引力の制御のため軸1の変位を検出す

る要があり、このため各電磁石に対応して差動変圧器方式などの変位センサ3a~3bが設けられて、軸1の上下、左右方向の偏心量がこれによって検出される。

第7図の右側部には上下方向の電磁石2a, 2bと変位センサ3a, 3bだけが示されており、両変位センサからの信号は差回路4によって差が取られ、これによって軸の上下方向の偏心量 δ を表す信号がこの差回路4から出力される。この偏心量信号は図の左側部の制御偏差回路5に与えられ、これによって偏心量の設定値 δ_0 と比較される。この制御偏差回路5もまた一種の差回路であって、偏心量の実測値 δ と偏心量の目標値である設定値 δ_0 との差の制御偏差 $\Delta\delta$ がこれから出力されて電流調節器6に与えられる。この電流調節器6は一般的にはPID調節器であり、制御信号を信号配分器7に与える。信号配分器7は電流値指令を励磁回路8a, 8bに与えるもので、軸1が例えば図の下方に偏心して偏心量 δ がその設定値 δ_0 よりも大で従って制御偏差 $\Delta\delta$ が正であるとき、

- 3 -

きない。しかし、この種の変位センサの分解能は現在知られている変位センサ中でも最高の部類に属するもので、これ以上の分解能をもつ変位センサを得ることは現状では非常に困難である。

さらに、この変位センサについての問題は若干の検出遅れがあることである。よく知られているように差動変圧器は交流励磁されその変位検出に要する時間は励磁の周波数によって決まってくる。もちろん、この周波数もかなり高く選定されているのであるが、原理上検出遅れ時間をなくすることはできない。軸系の固有振動の周波数によっても事情は異なるが、磁気軸受装置の制御上はこの遅れ時間は極力小さいことが望ましく、とくに制御ゲインを上げて制御誤差を圧縮しようとするとき、検出に遅れがあると制御系の安定度が落ちて来るので、望むように制御ゲインを上げることができなくなる。

かかる問題点の所在に立脚して、本発明は軸の変位ないしは偏心を検出する分解能が高く、軸振れを従来よりも小さく抑えることができる磁気軸

受回路8aへの電流値指令を増して上側の電磁石2aの吸引力を増加させるとともに、励磁回路8bへの電流値指令を減して下側の電磁石2bの吸引力を減少させる。このように、電磁石2a, 2bに対する第7図の制御系は変位センサ3a, 3bと差回路4によって検出された偏心量 δ を常に設定値 δ_0 になるように両電磁石に対する励磁電流を制御するわけで、このためこの種の磁気軸受装置は一般に能動系と呼ばれる。なお容易にわかるように、上述の設定値 δ_0 は通常は0であって軸1は両電磁石2a, 2bの中央ないしは中心に向けて制御される。(発明が解決しようとする問題点)

上述の磁気軸受装置はこの制御系の性能が良好でかつ充分高い制御ゲインをもつとき、偏心量 δ の制御誤差は結局変位センサの分解能によって決まる。変位センサとしては前述のように差動変圧器ないしはインダクタ形のものを用いられているが、その変位検出上の分解能はふつう $1 \sim 10 \mu\text{m}$ とされており、従ってこの種の変位センサを用いる限りいわゆる軸振れを $1 \mu\text{m}$ 以下に抑えることはで

- 4 -

受装置を得ることを目的とする。

(問題点を解決するための手段)

この目的は本発明によれば、磁気軸受装置を磁性体からなる軸をそれぞれ径方向に吸引するように該軸のまわりに配設された複数個の直流電磁石と、電磁石に流れる励磁電流の値を検出する電流検出器と、各電磁石により発生される軸に対する電磁的な吸引力を検出する力検出器と、電流検出器により検出された励磁電流の値と力検出器により検出された吸引力の値とから電磁石と軸との間の空隙長の値を計算により求める空隙長計算手段と、該手段により複数個の電磁石に対してそれぞれ計算された空隙長の値から軸の偏心量が所定の設定値になるように各電磁石に対する励磁電流の値を調節する励磁電流制御回路とにより構成することにより達成される。

(作用)

上述の構成からわかるように、本発明においては軸の変位量を検出するために電磁石に対する励磁電流の値を検出する電流検出器と電磁石が発生

する吸引力を検出する力検出器とを電磁石ごとに用い、これらの検出器からの検出値に基づいて各電磁石と軸との間の空隙長を計算によって電磁石ごとに求める。よく知られているように電磁石が発生する吸引力 F は励磁電流 I と空隙長 d との関数であって一般には次式で表わされる。

$$F = K \cdot (I^2 / d^2) \quad (1)$$

K は電磁石により決まる比例定数であり、 ρ 、 e はいずれも1以上の定数で、それぞれ1および2に近い値をもつ。

上式からわかるように、吸引力 F は空隙長 d の e 乗倍に反比例しており、磁気軸受装置において用いられるような空隙長 d の小さな範囲では空隙長 d が僅か変わるだけで吸引力 F が大きく変化する。逆にいえば吸引力 F の変位を検出すれば空隙長 d つまり軸の変位を細かく検出できるわけで、これによって本発明では軸変位の検出分解能を従来の1/10程度にすることができる。さらに、運転中における軸の変位は電磁石の吸引力以外の軸に掛かる外力に基づくものであるが、かかる

- 7 -

てはすべての電磁石に対応して電流検出器と力検出器を設けて空隙長を計算する必要は必ずしもなく、上下ないしは左右の電磁石対中の一方向についてのみ空隙長を得るようにして全体構成を簡略化することが可能である。前記構成中の励磁電流制御回路は上のようにして求められた偏心量を實際値としてそれを設定値と比較した制御偏差をなくすように励磁電流の値を調節してもよく、また後述の実施例におけるように、偏心量をわざわざ求めなくても空隙長の値に基づいて直ちに励磁電流を調節するようにしてもよい。

(実施例)

以下、図を参照しながら本発明の実施例を説明する。第1図および第2図は本発明の実施例を示すものである。

第1図には力検出器10a～10dの取り付け例が示されており、これらは図示のように電磁石2a～2bの軸1とは反対側の背面と固定環体5との間に挿入されている。この力検出器としては、ストレインゲージを用いたもの、超歪素子あるいは圧電セ

突然変位時に電磁石の励磁電流 I は直ちに反応しないので、変位はそのまま吸引力 F の変化に反映される。換言すれば、軸の動的な変位が直ちに吸引力 F の変化によって現われるので、本発明によれば軸の動的な変位を原理的に時間遅れなく検出できる。このため制御系を不安定にすることなく制御ゲインを上げることが可能になり、前述の検出分解能が高まることと相俟って、制御精度としての軸振れを従来よりもずっと少なく制御することができ、これによって前述の所題の課題が解決される。

なお、上述のように空隙長計算手段により空隙長が各電磁石について計算された後は簡単に偏心量をこれから得ることができる。すなわち、上下ないしは左右の電磁石について計算された空隙長の差をとることによって簡単に上下、左右方向の偏心量が求まる。あるいは、上下ないしは左右の電磁石対に対する空隙長の和は常に一定であるから、電磁石対中の一方について計算した空隙長からも偏心量は簡単に求まる。従って本発明におい

- 8 -

ンテ等を用いることができ、いずれも本質的に検出遅れなく電磁石の吸引力を検出することができる。

第2図は上下の電磁石2a, 2bと力検出器10a, 10bに関連する制御系を含む磁気軸受装置の全体構成を示すもので、左右の電磁石2c, 2dについても同様な構成が用いられる。電磁石2a, 2bは共通の直流電流により給電され、それを流れる励磁電流 I_a, I_b が例えば電流変成器である電流検出器20a, 20bによって検出される。空隙長計算手段30a, 30bは例えばアナログ演算回路であって、この励磁電流値 I_a, I_b と力検出器10a, 10bによって検出された吸引力値 F_a, F_b を入力する。この実施例の場合、前記の式において $p=1$ 、 $e=2$ として、これら空隙長計算手段30a, 30bは電磁石2a, 2bの空隙長 d_a, d_b を次式で演算出力する。

$$d_a = \sqrt{K \cdot I_a / F_a}, \quad d_b = \sqrt{K \cdot I_b / F_b} \quad (2)$$

これらの空隙長 d_a, d_b の値は励磁電流制御回路40内の差回路41に与えられ、偏心量 e がこれから出力される。励磁電流制御回路40内には別の差回

路42があり、この偏心量 θ の値をそれに対する設定値 θ_0 と比較して、制御偏差 $\Delta\theta$ を作る。調節器43はこの制御偏差 $\Delta\theta$ を受けて、これに基づいて図略に示された助磁調整器44に対する制御信号を作るもので、電磁石2a,2bのもつインダクタンス値、軸系がもつ慣性値、電磁石の吸引力による軸支持の固さ等の諸因子に適合するよう一般的にはPID調節器として構成される。助磁調整器44は図では簡単な調整抵抗として概念的に示されたように、調節器43からの制御信号を受けて従来技術と同様に、例えば制御偏差 $\Delta\theta$ が正のときには上側の電磁石2aに対する助磁電流を強め、下側の電磁石2bに対する助磁電流を同時に弱めることにより、軸1の位置を上方向に向けて操作する。この助磁調整器44は実際にはトランジスタやチャップ方式の電流調整回路として構成される。

第3図は空腔長 d が急変化したときのこの実施例における空腔長計算手段30a,30bによる検出速度を説明するためのもので、これから空腔長 d の変化 Δd に対する吸引力 F の変化 ΔF の比 $\Delta F/F$

-11-

み用には入力ポート35a,35bが設けられ、ADC 36a,36bおよび37a,37bによって変換されたそれらのデジタル値がマイクロコンピュータ30に与えられる。空腔長 d_a, d_b の計算は前の図式に基づいて精密に計算され、これから直ちに偏心量 θ が求まり、これによって前と同様に助磁電流を制御すればよいわけであるが、この実施例では最終被制御量が助磁電流であるからそれに対する制御偏差をこのマイクロコンピュータ30から出力するようになっている。

まず上のように空腔長 d_a, d_b がデジタル計算されるが、元来この空腔長 d_a, d_b の和は一定の所定値 d_{ab} になるはずであるが、検出誤差等や助磁電流 I_a, I_b の制御上の時間遅れのため必ずしも $d_{ab} = d_a + d_b$ が成立しない場合があり、このためこの等式が成立するように例えば比例配分法により一旦検出された空腔長 d_a, d_b の値に補正を加える。一方、容易にわかるように上下の電磁石2a,2bが発生する吸引力 F_a, F_b の間には軸1の系統の等価的な重さを W とすると、 $F_a = F_b + W$ が成立する

Δd が大きく、従って吸引力 F から空腔長 d の僅かな変化が検出できることがわかる。この検出感度ないし分解能は空腔長 d の動作点の選び方によって変わり、これを小さく目定するのが有利である。空腔長 d の動作点をこのように小さく目定することにより、図からわかるように同じ電磁石を大きな吸引力で利用することができ、また吸引力による軸の支承の固さも大きくできるので、軸受装置として一般的には望ましい方向になる。

以上の実施例では前の図式からわかるように空腔長 d の値を近似的に求めているが、第4図に示す実施例は空腔長計算手段30としてマイクロコンピュータを用いることにより空腔長 d の値をより精密に計算できるようにしたものである。これに用いるマイクロコンピュータは16ビット以上を具え10MHz以上のクロックをもつ高速動作可能なものがよく、通例のようにCPU31、ROM32、RAM33がバス34で結合されたものである。力検出器10a,10bからの吸引力 F_a, F_b の値および電流検出器20a,20bからの助磁電流 I_a, I_b の値の取り込

-12-

はずであり、吸引力 F_a, F_b についても同様な補正が可能である。第5図例はこれらの補正の結果の空腔長 d_a, d_b を示すもので、図の曲線ABは簡単化のため両電磁石2a,2bについて空腔長 d と助磁電流 I との関係が同じであるとして描かれている。また、軸1の偏心量 θ の設定値 θ_0 が0であり、従って両電磁石2a,2bに対する空腔長の目標値が同じ空腔長 d であるとする。図からわかるように、計算かつ補正された両電磁石2a,2bの空腔長 d_a, d_b に対応する助磁電流 I_a, I_b の値が曲線ABから求まり、それらの値と空腔長の目標値 d に対応する助磁電流 I の値の差から助磁電流に対する制御偏差 $\Delta I_a, \Delta I_b$ が計算できる。これらの制御偏差値は第4図の出力ポート38a,38bからそれぞれDAC 39a,39bを介して出力される。これを受けるのは前と同じく一般的にはPID調節器である電流調節器43a,43bであって、それらからの制御信号によってこの実施例の場合は上下の電磁石に対して別個に設けられた助磁回路44a,44bがそれぞれ電磁石2a,2bに対して助磁電流を供給する。

第5図例はこの実施例の動作のより一般的な場合を示すもので、上下の電磁石が発生すべき吸引力には元来軸の等価的な重さ W だけの差があり、従って両電磁石2a,2bについての空隙長 d と励磁電流 I との関係が異なる曲線A、Bをとる場合が示されている。また、両電磁石の空隙長の目標値も異なるので、これらが $da,db,0$ で示されている。この場合に制御偏差 ΔIa 、 ΔIb は同図例の場合と同様に計算され、マイクロコンピュータ30から出力される。

この例からもわかるように、本発明は以上説明した実施例のほか、種々の態様で実施をすることができる。

(発明の効果)

以上説明したように本発明においては磁性体からなる軸をそれぞれ径方向に吸引するように励磁のまわりに配設された複数の直流電磁石と、電磁石に流れる励磁電流の値を検出する電流検出器と、各電磁石により発生される軸に対する電磁的な吸引力を検出する力検出器と、電流検出器によ

り検出された励磁電流の値と力検出器により検出された吸引力の値とから電磁石と軸との間の空隙長の値を計算により求める空隙長計算手段と、該手段により演算個々の電磁石に対してそれぞれ計算された空隙長の値から軸の偏心量が所定の設定値になるように各電磁石に対する励磁電流の値を調節する励磁電流制御回路とから磁気軸受装置を構成するようにしたので、電磁石が本来持つその吸引力と空隙長との関係から、軸が偏心して空隙長が僅かに変化しても大きな変化を示す吸引力を力検出器によって鋭敏に捕えることができるので、吸引力の検出値から従来より約1桁高い分解能で軸の偏心量を正確に検出することができる。しかも、吸引力は軸の偏心量が急変した場合でも本質的に時間遅れなく吸引力からこの変化を捕えることができる。このように本発明によれば従来より高い分解能でかつ高速で軸の偏心量を検出することができるので、磁気軸受装置の能動制御系の制御ゲインを充分上げることによって、従来よりも軸振れをずっと少なく制御することができる。

-15-

-16-

以上の特長をもつ本発明による磁気軸受装置は大形回転機械用にとくに適し、かつ軸に急激な衝撃的ないしは振動的な外力が加わった時の制御性に優れており、大形回転機械に適用してその信頼性を向上し非接触式の利点を生かして保守の手間を削減することができる。

4.図面の簡単な説明

第1図から第5図までが本発明に関し、第1図は本発明による磁気軸受装置における電磁石と力検出器の配置を示す軸受部の横断面図、第2図は本発明装置の一実施例を示す構成回路図、第3図は電磁石の吸引力と空隙長との関係を示す線図、第4図は本発明装置の異なる実施例を示す構成回路図、第5図は励磁電流制御に関連する電磁石の空隙長と励磁電流との関係を示す線図である。第6図以降は従来技術に関し、第6図は従来の磁気軸受の横断面図、第7図は従来の磁気軸受装置の概要を示す構成回路図である。図において、

1:軸、2、2a~2d:電磁石、3a~3d:従来の変位センサ、10、10a~10d:力検出器、20a,20b:電

流検出器、30:空隙長計算手段ないしはマイクロコンピュータ、31:CPU、32:ROM、33:RAM、34:バス、35a,35b:入力ポート、36a,36b,37a,37b:ADC、38a,38b:出力ポート、39a,39b:DAC、43:励磁器、43a,43b:電流調節器、44:励磁調整器、44a,44b:励磁回路、d:空隙長ないしはその目標値、da,db:空隙長、da,db,0:空隙長の目標値、 Δd :空隙長の変化分、 δ :偏心量、 δ_0 :偏心量の設定値、 $\Delta \delta$:偏心量の制御偏差、 F, Fa, Fb :電磁石の吸引力、 ΔF :吸引力の変化分、 I, Ia, Ib :励磁電流、 $\Delta Ia, \Delta Ib$:励磁電流の制御偏差、である。

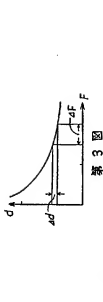
代理人力保上 山口 昭



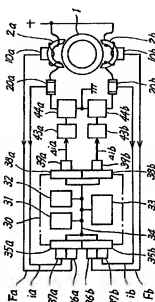
-17-

-83-

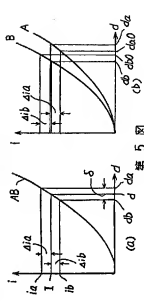
-18-



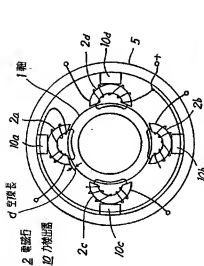
第 3 图



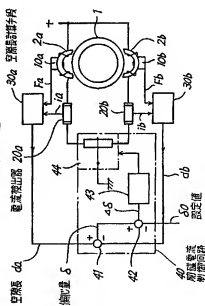
第 4 图



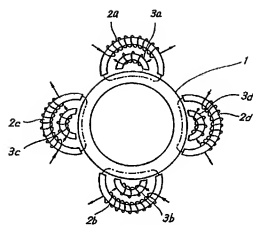
第 5 图



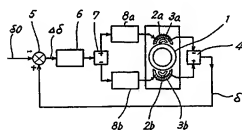
第 1 图



第 2 图



第 6 図



第 7 図